

Perjanjian No: III/LPPM/2013-03/22-P

# **PENENTUAN VISKOSITAS DAN SIMULASI MUDFLOW SUKARESMI-CIANJUR BERDASARKAN HASIL FLOW BOX TEST**



**Budijanto Widjaja, Ph.D.  
Prof. Paulus P. Rahardjo, Ph.D  
Wahyuning Aila  
Nessiana Novita**

**Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat  
Universitas Katolik Parahyangan  
2013**

# **PENENTUAN VISKOSITAS DAN SIMULASI MUDFLOW SUKARESMI-CIANJUR BERDASARKAN HASIL FLOW BOX TEST**

**Budijanto Widjaja, Ph.D**  
**Prof. Paulus P. Rahardjo, Ph.D**  
**Wahyuning Aila**  
**Nessiana Novita**

---

## **ABSTRAK**

Di Indonesia ini seperti yang kita ketahui banyak daerah yang rawan *Mudflow* merupakan bentuk perpindahan material tanah yang berupa aliran tanah pada tanah berbutir halus jenuh air. *Mudflow* terjadi saat tanah berada pada kondisi *viscous liquid* atau nilai indeks kecairan lebih dari 1. *Mudflow* yang terjadi di Sukaresmi, Cianjur pada Januari 2013 akan dianalisis pergerakannya dari daerah inisiasi hingga berhenti di daerah deposisi menggunakan bantuan program FLO-2D dengan parameter reologi berupa viskositas ( $\eta$ ) dan *yield stress* ( $\tau_y$ ) yang didapatkan dari hasil uji *Flow Box*. Simulasi akan dilakukan pada 3 Skenario berbeda, yaitu saat kadar air ( $w$ ) lebih kecil dari batas cair (LL), sama dengan LL, dan lebih besar dari LL. Sehingga dapat dilakukan suatu verifikasi dan validasi hasil uji *Flow Box* menggunakan program FLO-2D. Dari hasil simulasi program dapat diketahui bahwa *mudflow* terjadi saat kadar air sama dengan atau melebihi batas cair, dan nilai parameter reologi berpengaruh terhadap perilaku aliran *mudflow*.

*Kata kunci: Mudflow, kadar air, batas cair, FLO-2D, viskositas, yield stress*

## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR.....	v
DAFTAR TABEL.....	vi
BAB I .....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Tujuan Khusus .....	2
1.3    Urgensi Penelitian .....	3
BAB II .....	4
2.1    Definisi <i>Mudflow</i> .....	4
2.2    Sumber <i>Mudflow</i> .....	5
2.3    Lokasi dari studi kasus .....	8
2.4    Kondisi Geologi <i>Mudflow</i> .....	9
2.5    Parameter Tanah Mudflow .....	10
2.6    Pemodelan <i>Mudflow</i> .....	11
2.7    Hasil dan Analisis .....	11
2.7.1    Sifat Aliran .....	13
2.7.2    Perbedaan Kecepatan Aliran.....	13
2.7.3    Flow Depth .....	15
BAB III .....	16
3.1    Metode Penelitian .....	16

3.2	Alir Penelitian .....	17
BAB IV .....		18
4.1	Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	18
BAB V .....		19
5.1	Hasil Uji <i>Flow Box</i> .....	19
5.2	Hasil Pemodelan <i>Mudflow</i> Menggunakan Program FLO-2D.....	20
5.2.1	Skenario 1: Kondisi Plastis ( $w < LL$ ) .....	21
5.2.2	Skenario 2: Kondisi Kadar Air Sebesar Batas Cair ( $w = LL$ ) .....	21
5.2.3	Skenario 3: Kondisi <i>Viscous Liquid</i> .....	21
5.2.4	Sifat Aliran .....	22
5.2.5	Perbedaan Kecepatan Aliran.....	22
5.2.6	<i>Flow Depth</i> .....	24
BAB VI .....		25
6.1	Kesimpulan .....	25
6.2	Saran.....	26
DAFTAR PUSTAKA.....		55

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Ilustrasi <i>Mudflow</i> (BBC Inggris, 2013) .....	5
Gambar 2.2 (a) Transportasi <i>mudflow</i> Sukaresmi (b) Daerah deposisi mudflow...	6
Gambar 2.1 <i>Mudflow</i> di Sukaresmi.....	7
Gambar 2.2 Foto udara <i>mudflow</i> Sukaresmi dengan Google Earth .....	9
Gambar 2.3 Peta geologi lokasi <i>mudflow</i> Sukaresmi.....	10
Gambar 5.1 Hubungan viskositas $\eta$ dengan nilai indeks kecairan (LI).....	20

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter tanah untuk kasus <i>mudflow</i> Sukaresmi .....	11
Tabel 5.1 Parameter tanah untuk kasus <i>mudflow</i> Sukaresmi .....	19

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia yang merupakan negara dengan iklim tropis memiliki tingkat kelembapan sangat tinggi, hal ini mengakibatkan proses pelapukan pun menjadi semakin cepat. Karena itu, tanah di Indonesia didominasi oleh tanah residual yaitu tanah yang terbentuk dari pelapukan batuan. Dengan banyaknya daerah perbukitan dan pegunungan di Indonesia membuat Indonesia memiliki ancaman bencana alam yang sulit dihindari yaitu pergerakan massa tanah atau biasa disebut longsor.

Pergerakan massa tanah banyak macamnya, salah satunya adalah mudflow. Mudflow memiliki tingkat bahaya yang lebih tinggi karena mudflow merupakan keruntuhan yang terjadi pada tanah dengan kadar air tinggi sehingga material tanah berubah sifat menjadi cairan kental (viscous liquid). Sehingga dapat dikatakan bahwa mudflow merupakan bencana alam yang cukup berbahaya mengingat pergerakan material tanahnya yang sangat cepat dan berupa aliran wilayah yang terkena dampak dari bencana ini pun akan biasanya sangat luas.

Penelitian tentang mekanisme terjadinya mudflow masih minim dilakukan sehingga penulis berinisiatif untuk melakukan penelitian mengenai

penentuan karakteristik mudflow dari parameter kuantitatif mudflow. Supaya di kemudian dapat dijelaskan secara ilmu geoteknik, mekanisme terjadinya mudflow.

Lokasi dari penelitian terdiri dari dua lokasi. Lokasi mudflow yang pertama terletak di perbukitan Karanggantung Beunying Kp. Legok Lebe Desa Pakuon Kecamatan Sukaresmi Kabupaten Cianjur dan lokasi kedua terletak di Cililin, Bandung.

## **1.2 Tujuan Khusus**

Maksud penelitian ini adalah meneliti karakteristik mudflow dengan menganalisis terjadinya *mudflow* dari *source area* dan pergerakannya hingga ke daerah deposisi. Simulasi dilakukan untuk 3 kondisi yaitu pada saat material mudflow memiliki kondisi kadar air ( $w$ ) lebih kecil dari batas cair (LL), sama dengan batas cair, dan lebih besar dari batas cair.

Penelitian dilakukan dengan mengambil contoh tanah langsung dari lapangan kemudian diuji di laboratorium menggunakan *Flow Box Test* (FBT) untuk mendapatkan parameter kuantitatif mudflow yang kemudian dicocokkan hasilnya dengan analisis pemodelan yang dilakukan dengan bantuan program komputer FLO-2D.

Sehingga dapat diketahui kecepatan dan ketebalan aliran mudflow serta area yang terkena dampak aliran mudflow. Kemudian verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian dengan kondisi aktual di lapangan.



### **1.3 Urgensi Penelitian**

Mengingat banyaknya kejadian longsor yang merupakan mudflow di Indonesia maka penting kiranya jika kita dapat mengetahui karakteristik mudflow sehingga dapat kita ketahui cara untuk menghindari banyaknya korban jiwa jika mudflow sampai terjadi. Jika penelitian dilakukan lebih lanjut diharapkan bisa dibuat pemetaan wilayah-wilayah rawan mudflow.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

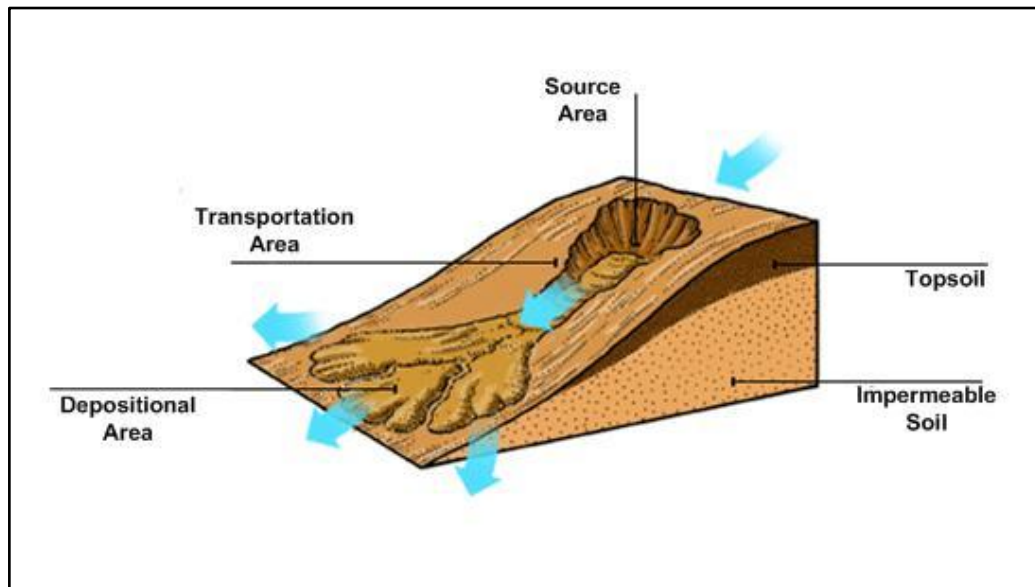
#### 2.1 Definisi *Mudflow*

Pergerakan tanah di daerah pegunungan dan perbukitan yang dapat mengakibatkan keruntuhan atau kegagalan lereng digolongkan berdasarkan dengan jenis pergerakan dan material yang dibawanya, salah satunya adalah *mudflow* (Varnes, 1978). *Mudflow* adalah pergerakan berupa aliran material tanah yang 80% nya berupa butiran tanah berukuran kurang dari 2 milimeter (Shroder, 1971) yang jenuh air hingga akhirnya mengalir dalam kondisi cairan kental (Hutchinson and Bhandari, 1971; Keefer and Johnson, 1983; e.g., Hutchinson, 1998). *Mudflow* terjadi saat kadar air sama atau melebihi batas cair tanah tersebut (Hung et al., 2001). Sharma (2010) menyimpulkan bahwa *mudflow* dalam keadaan *viscous liquid* akan mulai mengalami pergerakan jika kadar airnya sudah melebihi 50%.

Kecepatan aliran dari *mudflow* ini bisa sangat cepat,  $v \geq 0.05$  m/detik (*very rapid*) bahkan sangat cepat sekali,  $v \geq 5$  m/detik (*extremely rapid*) tergantung dari viskositas aliran (Cruden and Varnes, 1996; Varnes, 1978). Karena pergerakan aliran tanah yang sangat cepat dan dapat bersifat tiba-tiba, *mudflow* sangat berpotensi menyebabkan kerusakan yang besar bagi area yang terkena oleh alirannya.

Hujan lebat bisa berperan sebagai pemicu terjadi *mudflow* dan dapat bergerak dengan ketebalan yang tergantung pada kondisi tanah di lokasi (Liu and Mason, 2009). Kecuraman lereng rawan *mudflow* biasanya berkisar antara  $25^\circ - 53^\circ$  (Liu and Mason, 2009) atau  $25^\circ - 40^\circ$  (Schroot et al., 1996).

*Mudflow* tidak selalu tersusun dari butiran halus tapi bisa juga terdiri dari campuran batuan kecil atau kerikil (Fang and Daniels, 2006). Namun, itu tidak secara signifikan mempengaruhi perilaku cairan (O'Brien, 2003).



Gambar 1.1 Ilustrasi *Mudflow* (BBC Inggris, 2013)

## 2.2 Sumber *Mudflow*

Pemicu terjadinya *mudflow* digolongkan menjadi dua menurut Terzaghi (1950), Krynine et al. (1957), Fritz dan Moore (1988). Day (1999), dan Woo (1999):

1. Pemicu internal:
  - a. Longsor (*landslides*) atau pergerakan tanah rayapan (*creep*)
  - b. Jenis tanah dan ketebalan *source area*
  - c. Kecuraman dan panjang lereng di *source area*
2. Pemicu eksternal:
  - a. Jumlah dan intensitas dari curah hujan  
Terutama saat curah hujan tinggi pada satu daerah dengan tingkat vegetasi yang rendah.
  - b. Getaran  
Gempa, letusan gunung berapi, pemancangan tiang.

c. Perubahan iklim

Erosi, penggundulan hutan akibat kebakaran hutan atau penebangan, dan faktor-faktor lain akibat tindakan manusia

Penyebab terjadinya *mudflow* juga berhubungan erat dengan perubahan kondisi alam seperti intensitas curah hujan, penggundulan hutan, aktivitas tektonik yang berkaitan dengan aktivitas gunung berapi, kondisi geologi, dan kondisi tanah (Sidle dan Ochiai, 2006; Marfai et al., 2008). Karena kondisi yang sulit diprediksi dan kompleks, pemantauan dan memperoleh data pada permulaan *mudflow* sangat sulit (Hough, 1957).

Pergerakan *mudflow* yang seperti aliran (Gambar 2.2a), biasanya berbentuk seperti sungai kecil dan dangkal mengikuti geometri lereng, kemudian menyebar jika telah mencapai area yang datar, meskipun ketebalan material *mudflow* sudah sangat tipis namun material akan tetap bergerak mencari daerah yang lebih rendah karena pengaruh gaya gravitasi. Jika aliran berada pada kondisi lereng yang lebih curam, material akan bergerak mengalir membentuk suatu saluran yang agak dalam (*channel*). Gambar 2.2b menunjukkan daerah deposisi *mudflow* Sukaresmi.



Gambar 0.2 (a) Transportasi *mudflow* Sukaresmi (b) Daerah deposisi mudflow

Kasus yang sudah dilakukan penelitian dan didapat hasilnya adalah *mudflow* yang terjadi di Sukaesmi – Cianjur pada 18 Januari 2013 (Gambar 2.1) . Dari uji laboratorium pada tanah Sukaesmi didapat  $LL = 66$ ,  $PL = 47.52$ , dan  $IP = 18.48$  dengan nilai berat jenis tanah ( $G_s$ ) sebesar 2.55. Dari hasil saringan uji hidrometer menunjukkan bahwa sampel memiliki komposisi butiran kasar sebesar 3.27% dan butiran halus dengan komposisi lanau lebih tinggi sebesar 70.13% dibandingkan dengan lempung yaitu sebesar 26.6%. Persentasi butir halus adalah 96.73% dan hal ini sesuai dengan rekomendasi dari Shroder (1971) bahwa material *mudflow* terdiri dari 80% butiran tanah berukuran kurang dari 2 milimeter. Kadar air alami di area deposisi adalah 66.41% hasil ini lebih besar 0.6% dari batas cairnya ( $LL = 66$ ). Indikasi ditemukannya mata air di dekat *source area* dan hujan lebat yang turun dalam beberapa hari sebelum hingga saat kejadian membuat tanah berada pada kondisi sangat jenuh hingga mencapai batas cair, kemudian tanah bergerak turun menuju kaki lereng sebagai *mudflow*.



Gambar 2.3 *Mudflow* di Sukaesmi

### 2.3 Lokasi dari studi kasus

*Mudflow* terjadi di daerah perbukitan Gunung Karanggantung Beunying Kampung Legok Lebe RT 02/07 Desa Pakuon Kecamatan Sukaresmi Kabupaten Cianjur. Bukit ini sebagian besar digunakan penduduk setempat sebagai daerah bercocok tanam berupa ladang dan kebun. Pengalihan fungsi lahan ini bisa menjadi salah satu pemicu terjadinya *mudflow*, ditambah dengan ditemukannya mata air di dekat *source area* dan hujan lebat yang turun selama beberapa hari sebelum terjadi *mudflow*. Dari hasil observasi lapangan dan wawancara dengan penduduk setempat *mudflow* bergerak dari *source area* hingga area deposisi selama kurang lebih 20 menit. Material akhirnya berhenti di kaki bukit di mana pada daerah itu terdapat peternakan milik warga. Bukit ini memiliki tinggi lebih dari 150 m dengan kecuraman lereng  $\pm 30^\circ$ . Volume material *mudflow* yang berpindah diasumsikan sebesar  $600 \text{ m}^3$  dan volume di *source area* dan area deposisi sama besarnya, karena aliran *mudflow* dianggap sebagai aliran laminar jadi dianggap tidak ada material yang terdeposisi selama proses transportasi. Volume didapat dengan menggunakan persamaan Lu dan Godt (2013):

$$V = \frac{\pi}{6}(l) \cdot (w) \cdot (d) \quad (2.1)$$

dengan  $V$  = Volume material yang berpindah ( $\text{m}^3$ )

$l$  = Panjang asumsi *source area* (m)

$w$  = Lebar asumsi *source area* (m)

$d$  = Kedalaman asumsi *source area* (m)

Panjang lintasan transportasi *mudflow* sepanjang  $\pm 368 \text{ m}$  dengan lebar bervariasi antara  $15 - 40 \text{ m}$ . Gambar 4.2 menunjukkan foto udara lokasi *mudflow*.

Analisis *mudflow* dibagi menjadi tiga bagian yaitu *source area*, transportasi, dan daerah deposisi. Definisi dari *source area* adalah daerah dimana tanah mengalami keruntuhan dan berubah bentuk menjadi aliran

lumpur. Jalur transportasi merupakan jalan bagi *mudflow* menurun lereng hingga mencapai tempat datar, dan *mudflow* mengalami pertambahan kecepatan selama proses transportasi hingga akhirnya mengalami perlambatan setelah mencapai daerah yg relatif datar dan terbentuklah material endapan atau deposisi.



Gambar 2.4 Foto udara *mudflow* Sukaresmi dengan Google Earth

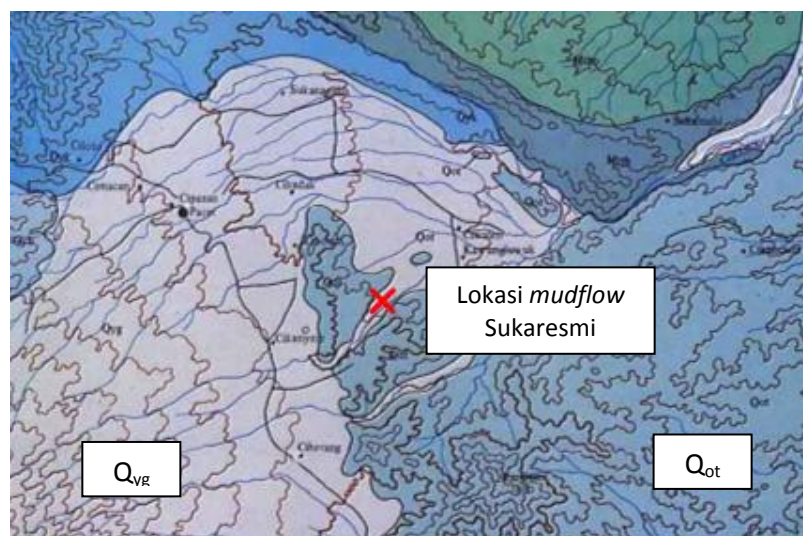
#### 2.4 Kondisi Geologi *Mudflow*

Sukaresmi berlokasi dekat dengan gunung Gede – Pangrango. Peta geologi pada Gambar 4.3 menjelaskan bahwa di wilayah ini terbentuk dari formasi batuan sedimen dan batuan gunungapi. Sukaresmi merupakan formasi lembar Cianjur dan memiliki satuan peta geologi  $Q_{yg}$  (abu-abu) yaitu breksi dan endapan lahar dari gunung Gede dengan ketebalan 0 – 100 m. Dengan jenis batuan *tuffaceous sandstone, shale*, breksi, dan konglomerat. Lokasi *mudflow* pun berbatasan satuan peta  $Q_{ot}$  (biru muda) yang merupakan produk vulkanik tertua yaitu breksi dan lava dengan ketebalan 0 – 550 m, formasi ini terisolasi oleh daerah perbukitan  $Q_{yg}$ .

Breksi adalah batuan yang terbentuk dari bongkahan-bongkahan batu besar yang terjadi saat letusan gunung berapi dan tersementasi bersama dengan



batuan yang sudah terpecah-pecah menjadi batuan yang lebih kecil dan bersudut. Jenis batuan ini belum berpindah terlalu jauh dari sumbernya. Pembentukan breksi biasanya melalui proses pembentukan batuan yang menumpuk dalam jangka waktu cukup lama di lereng bukit yang curam atau di kaki tebing. Breksi vulkanik tersusun atas lava blok dalam matriks abu dan merupakan produk dari letusan eksplosif gunung berapi. Susunan matriks juga dapat berisi pasir atau debu vulkanik. Kandungan ini membuat tanah subur dan penduduk setempat menjadikan lereng di bukit ini sebagai ladang dan kebun. *Sandstone* bersifat sangat poros dan permeabel sehingga mudah terinfiltrasi bila hujan turun. *Shale* adalah jenis material yang mudah melapuk saat perubahan cuaca dan jika terjadi kontak langsung dengan air maupun udara (Handy dan Spangler, 2007).



Gambar 2.5 Peta geologi lokasi *mudflow* Sukaresmi

## 2.5 Parameter Tanah Mudflow

Sampel tanah terganggu yang diperoleh dari area *mudflow* merupakan lanau kepasiran. *Flow box test* (FBT) dilakukan untuk mengetahui viskositas dari aliran *mudflow*. Tanah ini memiliki persentasi lanau lebih tinggi sebesar 70.13% dibandingkan dengan lempung sebesar 26.6% dan berdasarkan Unified Soil



Classification System (USCS) digolongkan sebagai lanau dengan plastisitas tinggi (MH). Tabel 4.1 menyajikan parameter-parameter tanah tersebut.

Tabel 2.1 Parameter tanah untuk kasus *mudflow* Sukaresmi

Sampel tanah	LL	PL	PI	$G_s$	$w$ %	USCS
Sukaresmi	66	47.52	18.48	2.55	66.41	MH

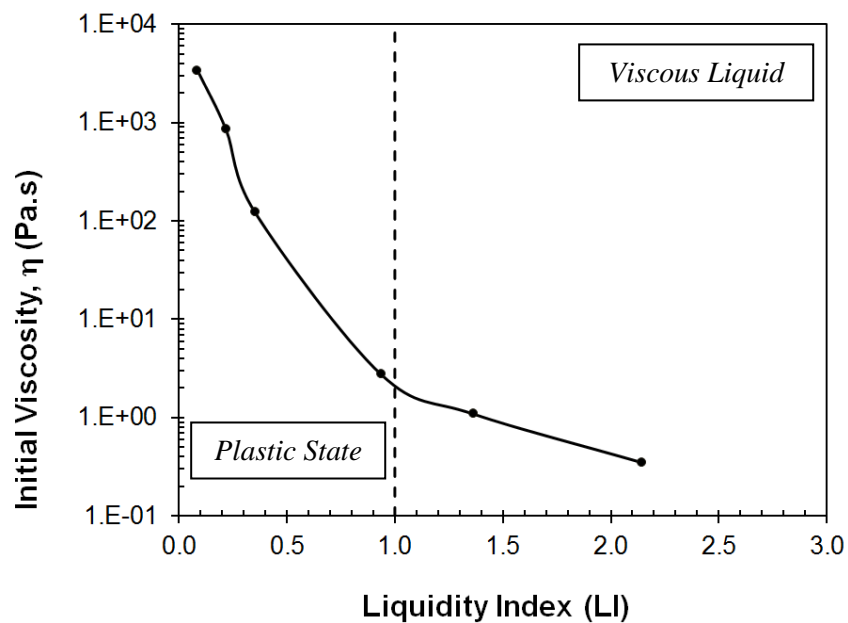
Catatan: LL = liquid limit; PL = plastic limit; PI = plasticity index;  
 $G_s$  = specific gravity;  $w$  = kadar air alami

## 2.6 Pemodelan *Mudflow*

Nilai dari koefisien Manning's ( $n$ ) berkisar di rentang 0.0083 hingga 0.43 (COE, 1997). Karena nilai koefisien Manning's menggambarkan nilai koefisien friksi maka untuk kasus *mudflow* Sukaresmi diambil nilai  $n$  sebesar 0.2. Tabel 4.2 menunjukkan besaran koefisien Manning's berdasarkan jenis benda yang ada di permukaan tanah.

## 2.7 Hasil dan Analisis

Uji laboratorium menggunakan *flow box* menghasilkan nilai viskositas yang beragam karena menggunakan kadar air tiap sampelnya berbeda. Semakin tinggi kadar air maka perpindahan yang terjadi akan semakin besar dan cepat. Hubungan antara nilai viskositas dengan LI untuk tanah Sukaresmi menggunakan uji *flow box* (FBT) ditunjukkan oleh Gambar 2.4. Hasil ini menyatakan rentang pengujian nilai viskositas dari FBT dapat dilakukan dalam 2 fase: fase plastis ( $LI < 1$ ) dan fase cairan kental ( $LI \geq 1$ ).



Gambar 2.4 Hubungan viskositas dengan nilai indeks kecairan (LI)

Pada simulasi akan dilakukan pada tiga skenario/kondisi untuk bisa mewakili dua keadaan plastis dan *viscous liquid* menggunakan program komputer FLO-2D. Data *input* yang digunakan adalah viskositas an *yield stress* ( $\tau_y$ ) yang merupakan fungsi dari *solid concentration by volume* ( $C_v$ ) hasil uji *flow box*. Skenario 1, 2, dan 3 dibedakan dari tingkat kadar air; lebih rendah, sama dengan, dan lebih tinggi dari batas cair (LL). Parameter *mudflow* masing-masing skenario dirangkum di Lampiran 1.

Tabel 2.2 Parameter untuk simulasi *mudflow* Sukaresmi menggunakan FLO-2D

Skenario	1	2	3
	w < LL	w = LL	w > LL
w (%)	51.55	64.82	87.12
LI	0.22	0.94	2.14
$C_v$	0.432	0.377	0.310
$\tau_y$ (kPa)	0.08	0.018	0.01405
$\eta$ (Pa.s)	445	1.826	0.0137

### 2.7.1 Sifat Aliran

Menurut O'Brien dan Julien (1988) Skenario 1 dapat dikatakan sebagai longsor (*landslide*). Skenario 2 dan Skenario 3 bisa dikatakan sebagai *mudflow*. Pengklasifikasian ini secara tidak langsung menyatakan longsor (*landslide*) terjadi pada saat tanah berada pada kondisi plastis (*plastic state*) yaitu saat nilai  $LI < 1$ , sedangkan *mudflow* terjadi saat kondisi tanah *viscous liquid* atau saat  $LI \geq 1$  (Hung et al. 2001; O'Brien dan Julien 1998).

### 2.7.2 Perbedaan Kecepatan Aliran

Kecepatan aliran antara Skenario 2 dan Skenario 3 tidak terlalu jauh berbeda dengan persen beda 32%. Skenario 1 membutuhkan waktu 1 jam 42 menit untuk simulasi pergerakan material *mudflow* dari *source area* hingga berhenti bergerak dengan kecepatan maksimum 0.2 m/s. Sedangkan Skenario 2 dan 3 membutuhkan waktu 1 jam dan 32 menit 48 detik karena memiliki nilai viskositas yang lebih rendah dibandingkan dengan viskositas pada Skenario 1. Kecepatan maksimum aliran Skenario 2 hampir sama yaitu antara 0.9 - 8.7 m/s. Oleh karena itu, viskositas mempengaruhi tinggi kecepatan aliran, dengan menurunnya viskositas maka besar kecepatan aliran semakin tinggi.

Hasil simulasi dari Skenario 2 menjelaskan bagaimana *mudflow* bergerak dalam hubungan kadar air ( $w$ ) dan viskositas. Seluruh material dari *source area* berpindah ke daerah deposisi dengan asumsi bahwa volume di daerah deposisi mendekati atau sama dengan volume di *source area*. Hal ini pun menegaskan bahwa pada saat kadar air sama dengan batas cair, tanah berubah menjadi *mudflow* (Olson, 1989).

*Mudflow* dianggap bergerak tanpa ada volume yang terdeposisi selama perpindahan, deposisi hanya ada pada area deposisi di mana hal ini dipengaruhi oleh viskositas aliran itu sendiri. Jika kadar air meningkat menjadi lebih besar dari batas cair (Skenario 3), *mudflow* akan cenderung memiliki perilaku yang sama

dengan hasil simulasi Skenario 2 karena perbedaan viskositas yang tipis sebesar 0.4% bila dibandingkan dengan Skenario 1.

Membandingkan penurunan nilai viskositas sebesar 99.58% dari kondisi plastis (Skenario 1) ke kondisi batas cair (Skenario 2), kecepatan aliran maksimum yang terjadi meningkat sebesar 42 kali. Sedangkan pada Skenario 3, penurunan viskositas sebesar 99.96% dari keadaan plastis (Skenario 1) ke kondisi *viscous liquid* menghasilkan peningkatan kecepatan aliran maksimum sebesar 43.5 kali. Kecepatan ( $v$ ) pada Skenario 3 lebih cepat 37.9% daripada Skenario 2. Rentang kecepatan dari 0.2 m/s hingga 8.7 m/s menunjukkan perubahan kecepatan yang signifikan saat tanah berubah bentuk dari kondisi plastis ke kondisi *viscous liquid*. Penurunan nilai viskositas yang kecil saat kondisi *viscous liquid* menghasilkan peningkatan kecepatan yang tipis pula.

*Mudflow* dianggap terjadi pada saat kecepatan ( $v$ ) lebih tinggi dari 0.05 m/s (Hungr et al. 2001). Pernyataan ini hanya dapat diterima jika kadar air *mudflow* sama dengan atau lebih besar dari batas cair (LL), hal ini dijelaskan dari hasil analisa Skenario 2 dan Skenario 3.

Perbedaan kondisi *mudflow* menunjukkan perubahan viskositas yang akan berpengaruh pada pengklasifikasian pergerakan tanah (longsor atau *mudflow*). Pergerakan tanah dimulai saat kondisi plastis, di mana longsor terjadi pertama kali (Skenario 1). Kemudian, saat kadar air ( $w$ ) meningkat hingga besarnya sama dengan batas cair (LL), tanah akan bergerak mengalir menjadi *mudflow* (Skenario 2). Jika kadar air ( $w$ ) mengalami peningkatan lebih tinggi (Skenario 3), kecepatan aliran juga meningkat seiring dengan penurunan viskositas dan berubah menjadi kondisi cair. Hasil simulasi ini membuktikan pernyataan O'Brien dan Julien (1998).

Oleh karena itu, parameter kunci dalam melakukan simulasi *mudflow* adalah nilai viskositas. Perubahan kondisi tanah (dari kondisi plastis sampai

kondisi (*viscous liquid*) menjelaskan sifat perilaku *mudflow*, termasuk kecepatan aliran.

### 2.7.3 Flow Depth

Ketebalan aliran untuk Skenario 1 adalah 3.3 m. Sedangkan untuk Skenario 2 dan 3 memiliki ketebalan 2.9 dan 2.4 m. Karena kadar air ( $w$ ) pada Skenario 1 lebih kecil dari batas cair (LL) maka tanah berada pada keadaan plastis dan tidak dapat diklasifikasikan sebagai bentuk aliran (Lampiran 1). Ketebalan kedalaman aliran selama transportasi berkisar antara 0.5 – 3.3. Tidak ada material yang terdeposisi di daerah yang datar untuk Skenario 1. Pergerakan material berhenti saat masih berada di atas lereng dekat dengan *source area* dengan waktu 1 jam 42 menit.

Skenario 2 menunjukkan material mengalir dari *source area* dengan karakteristik seperti sebuah aliran selama proses transportasi, kadar air Skenario 2 yang paling mendekati batas cair. Material tanah mencapai daerah deposisi selama 1 jam dengan ketebalan aliran antara 1.7 m hingga 3.8 m. Lampiran 2 menunjukkan pergerakan ketebalan material tanah selama transportasi dan menegaskan bahwa pergerakan material untuk Skenario 2 memiliki karakteristik sebagai aliran material.

Skenario 3 memiliki kecenderungan bentuk pergerakan material yang sama dengan Skenario 2 (Lampiran 3). Ketebalan material aliran selama transportasi berkisar antara 0.4 – 3.6 m, hampir sama dengan ketebalan aliran pada Skenario 2. Waktu yang dibutuhkan material tanah untuk mengalir dari *source area* hingga berhenti di area deposisi adalah 32 menit 48 detik. Ketebalan material di daerah deposisi adalah 2.4 m, dibandingkan dengan hasil pengukuran di lapangan, ketebalan material di daerah deposisi berkisar antara 1.5 – 2.5 m. Jadi, hasil Skenario 2 dan 3 relatif mendekati kondisi aktual di lapangan. Karena pengurangan nilai  $C_v$  (*solid concentration by volume*) Skenario 3 menghasilkan ketebalan material aliran yang semakin kecil.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Metode Penelitian**

Penulisan studi ini akan dilakukan dengan 4 (empat) tahap pengerjaan, yaitu:

1. Studi lapangan

Studi lapangan dengan mendatangi lokasi kejadian dilakukan untuk mendapatkan gambaran langsung tentang keadaan di lapangan. Studi lapangan dimaksudkan pula untuk mengambil contoh tanah yang kemudian diuji di laboratorium dan mendapatkan informasi data tanah yang diperlukan.

2. Studi pustaka

Studi pustaka dilakukan untuk mendapatkan pengetahuan dalam pembahasan masalah yang sedang diteliti. Studi pustaka berupa buku dan artikel ataupun sumber tulisan dari media internet.

3. Pengumpulan data

Pengumpulan data berupa data tanah dan data kontur. Pengumpulan data dilakukan dengan mendatangi langsung lokasi kejadian untuk mengumpulkan sampel tanah kemudian membuat batasan area lokasi kejadian.

4. Uji laboratorium dan analisis menggunakan program FLO-2D

Uji laboratorium dilakukan dengan menggunakan alat uji *Flow Box Test* (FBT). Analisis untuk mendapatkan hasil pergerakan *mudflow* dengan menggunakan metode beda hingga (*finite difference*) kemudian dimodelkan menggunakan program komputer FLO-2D.

### 3.2 Alir Penelitian

Studi ini dimulai dengan studi lapangan yang berlokasi di daerah perbukitan Gunung Karanggantung Beunying Kampung Legok Lebe RT 02/07 Desa Pakuon Kecamatan Sukaresmi Kabupaten Cianjur pada tanggal 23 Januari 2013 dan Cililin, Bandung pada tanggal 28 Maret 2013 yang bertujuan untuk mengumpulkan data lapangan berupa koordinat lapangan dan contoh sampel tanah *disturbed*. Selanjutnya dilakukan studi pustaka yaitu mencari literatur yang berhubungan dengan penelitian. Tahap analisis dan simulasi pada 3 kondisi, yaitu:

1. Kadar air ( $w$ ) lebih kecil dari batas cair (LL)
2. Kadar air ( $w$ ) sama dengan dari batas cair (LL)
3. Kadar air ( $w$ ) lebih besar dari batas cair (LL)

Hasil simulasi program akan dibandingkan dengan kondisi aktual di lapangan kemudian verifikasi hasil uji *flow box* (FBT). Tahapan yang terakhir adalah penarikan kesimpulan kemudian selesai.

## BAB IV

### JADWAL PELAKSANAAN

#### 4.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Nama Kegiatan	2013																											
	Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni							
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Site Visit Sukaresmi																												
Uji Flow Box																												
Pemodelan Mudflow																												
Seminar ATPW																												
Site Visit Cililin																												



## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 5.1 Hasil Uji *Flow Box*

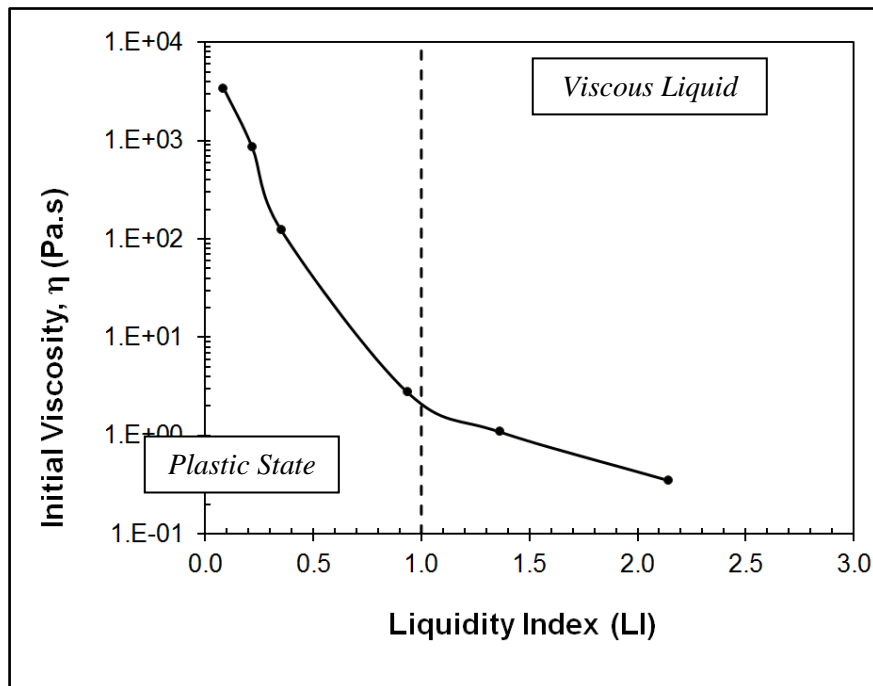
Sampel tanah terganggu yang diperoleh dari area *mudflow* merupakan lanau kepasiran. *Flow box test* (FBT) dilakukan untuk mengetahui viskositas dari aliran *mudflow*. Tanah ini memiliki persentasi lanau lebih tinggi sebesar 70.13% dibandingkan dengan lempung sebesar 26.6% dan berdasarkan Unified Soil Classification System (USCS) digolongkan sebagai lanau dengan plastisitas tinggi (MH). Tabel 5.1 menyajikan parameter-parameter tanah tersebut.

Tabel 5.1 Parameter tanah untuk kasus *mudflow* Sukaresmi

Sampel tanah	LL	PL	PI	G <sub>s</sub>	w %	USCS
Sukaresmi	66	47.52	18.48	2.55	66.41	MH

Catatan: LL = liquid limit; PL = plastic limit; PI = plasticity index;  
G<sub>s</sub> = specific gravity; w = kadar air alami

Uji laboratorium menggunakan *flow box* menghasilkan nilai viskositas yang beragam karena menggunakan kadar air tiap sampelnya berbeda. Semakin tinggi kadar air maka perpindahan yang terjadi akan semakin besar dan cepat. Hubungan antara nilai viskositas ( $\eta$ ) dengan LI untuk tanah Sukaresmi menggunakan uji *flow box* (FBT) ditunjukkan oleh Gambar 4.7. Hasil ini menyatakan rentang pengujian nilai  $\eta$  dari FBT dapat dilakukan dalam 2 fase: fase plastis ( $LI < 1$ ) dan fase cairan kental ( $LI \geq 1$ ).



Gambar 5.1 Hubungan viskositas  $\eta$  dengan nilai indeks kecairan (LI)

## 5.2 Hasil Pemodelan *Mudflow* Menggunakan Program FLO-2D

Pada simulasi akan dilakukan pada tiga skenario/kondisi untuk bisa mewakili dua keadaan plastis dan *viscous liquid* menggunakan program komputer FLO-2D. Data *input* yang digunakan adalah viskositas ( $\eta$ ) dan *yield stress* ( $\tau_y$ ) yang merupakan fungsi dari *solid concentration by volume* ( $C_v$ ) hasil uji *flow box*. Skenario 1, 2, dan 3 dibedakan dari tingkat kadar air; lebih rendah, sama dengan, dan lebih tinggi dari batas cair (LL). Parameter *mudflow* masing-masing skenario dirangkum di Lampiran 1.

Tabel 4.3 Parameter untuk simulasi *mudflow* Sukaesmi menggunakan FLO-2D

Skenario	1	2	3
	w < LL	w = LL	w > LL
w (%)	51.55	64.82	87.12
LI	0.22	0.94	2.14
$C_v$	0.432	0.377	0.310
$\tau_y$ (kPa)	0.08	0.018	0.01405
$\eta$ (Pa.s)	445	1.826	0.0137

### 5.2.1 Skenario 1: Kondisi Plastis ( $w < LL$ )

Skenario 1 menggunakan kadar air ( $w$ ) lebih kecil (51.55%) dari batas cair LL (66), dan dengan nilai viskositas ( $\eta$ ) sebesar 445 Pa·s, *yield stress* ( $\tau_y$ ) sebesar 0.08 kPa, *solid concentration by volume* ( $C_v$ ) sebesar 0.432. Kedalaman maksimum aliran *mudflow* Skenario 1 adalah 3.3 m. Pergerakan tanah pada Skenario 1 tidak berpindah terlalu jauh dari *source area* dan lokasi jatuhnya deposisi kurang lebih berjarak 30 m dari *source area*. Aliran *mudflow* berhenti setelah mencapai 1 jam 42 menit dengan kecepatan maksimum yang dicapai 0.2 m/s atau setara dengan 0.72 km/jam. Panjang aliran pada Skenario 1 kurang lebih hanya 50 m. Hasil simulasi Skenario 1 dapat dilihat pada Lampiran 1.

### 5.2.2 Skenario 2: Kondisi Kadar Air Sebesar Batas Cair ( $w = LL$ )

Skenario 2 menggunakan  $w$  sama dengan LL. Berdasarkan hasil simulasi tanah bergerak sebagai aliran. Material tanah mengalir menuju kaki bukit karena nilai  $\eta$  yang lebih rendah. Perbandingan dengan Skenario 1, nilai  $\eta$ ,  $\tau_y$ , dan  $C_v$  menurun sebesar 99.48%, 77.5%, dan 12.76%. Reduksi dari  $\eta$  menghasilkan kecepatan aliran yang lebih cepat sedangkan reduksi  $\tau_y$  dan  $C_v$  menghasilkan area deposisi yang lebih luas, mempengaruhi ketebalan deposisi, dan panjang transportasi aliran. Aliran berhenti di kaki bukit dekat peternakan dengan ketebalan 1.7 – 2.9 m, hal ini mendekati kondisi aktual di lapangan di mana area deposisi jatuh tepat di peternakan tersebut, dengan ketebalan material deposisi di lapangan berkisar antara 1.5 – 2.5 m. Hasil simulasi membuktikan bahwa *mudflow* berada pada kondisi *viscous liquid*. Aliran *mudflow* bergerak selama 1 jam dengan panjang transportasi aliran sekitar 350 m dengan kecepatan rata-rata 1.9 m/detik atau setara dengan 6.8 km/jam. Hasil simulasi Skenario 2 dapat dilihat pada Lampiran 2.

### 5.2.3 Skenario 3: Kondisi *Viscous Liquid*

Skenario 3 memiliki kadar air yang lebih besar (87.12%) dari batas cair (LL). Dibandingkan dengan Skenario 1,  $\eta$ ,  $\tau_y$ , dan  $C_v$  untuk Skenario 3 menurun sebesar 99.96%, 82.4%, dan 28.27%. Pada keadaan ini *mudflow* berada pada kondisi cair dengan sifat aliran hampir sama dengan Skenario 2 namun memiliki kecepatan yang lebih tinggi yaitu sebesar 2.8 m/s atau

setara dengan 10 km/jam karena nilai viskositas yang semakin kecil dan deposisi berhenti lebih jauh sekitar 60 m dari Skenario 2 hal ini disebabkan karena sifat material yang lebih cair maka alirannya bergerak semakin cepat dan jauh. Hasil simulasi Skenario 3 dapat dilihat pada Lampiran 3.

#### 5.2.4 Sifat Aliran

Menurut O'Brien dan Julien (1988) Skenario 1 dapat dikatakan sebagai longsor (*landslide*). Skenario 2 dan Skenario 3 bisa dikatakan sebagai *mudflow*. Pengklasifikasian ini secara tidak langsung menyatakan longsor (*landslide*) terjadi pada saat tanah berada pada kondisi plastis (*plastic state*) yaitu saat nilai  $LI < 1$ , sedangkan *mudflow* terjadi saat kondisi tanah *viscous liquid* atau saat  $LI \geq 1$  (Hung et al. 2001; O'Brien dan Julien 1998).

#### 5.2.5 Perbedaan Kecepatan Aliran

Kecepatan aliran antara Skenario 2 dan Skenario 3 tidak terlalu jauh berbeda dengan persen beda 32%. Skenario 1 membutuhkan waktu 1 jam 42 menit untuk simulasi pergerakan material *mudflow* dari *source area* hingga berhenti bergerak dengan kecepatan maksimum 0.2 m/s. Sedangkan Skenario 2 dan 3 membutuhkan waktu 1 jam dan 32 menit 48 detik karena memiliki nilai viskositas yang lebih rendah dibandingkan dengan viskositas pada Skenario 1. Kecepatan maksimum aliran Skenario 2 hampir sama yaitu antara 0.9 -8.7 m/s. Oleh karena itu, viskositas ( $\eta$ ) mempengaruhi tinggi kecepatan aliran, dengan menurunnya viskositas ( $\eta$ ) maka besar kecepatan aliran semakin tinggi.

Hasil simulasi dari Skenario 2 menjelaskan bagaimana *mudflow* bergerak dalam hubungan kadar air ( $w$ ) dan viskositas ( $\eta$ ). Seluruh material dari *source area* berpindah ke daerah deposisi dengan asumsi bahwa volume di daerah deposisi mendekati atau sama dengan volume di *source area*. Hal ini pun menegaskan bahwa pada saat kadar air sama dengan batas cair, tanah berubah menjadi *mudflow* (Olson, 1989).

*Mudflow* dianggap bergerak tanpa ada volume yang terdeposisi selama perpindahan, deposisi hanya ada pada area deposisi di mana hal ini dipengaruhi oleh viskositas aliran itu sendiri. Jika kadar air meningkat menjadi lebih besar dari batas cair (Skenario 3), *mudflow*

akan cenderung memiliki perilaku yang sama dengan hasil simulasi Skenario 2 karena perbedaan viskositas yang tipis sebesar 0.4% bila dibandingkan dengan Skenario 1.

Membandingkan penurunan nilai viskositas sebesar 99.58% dari kondisi plastis (Skenario 1) ke kondisi batas cair (Skenario 2), kecepatan aliran maksimum yang terjadi meningkat sebesar 42 kali. Sedangkan pada Skenario 3, penurunan viskositas sebesar 99.96% dari keadaan plastis (Skenario 1) ke kondisi *viscous liquid* menghasilkan peningkatan kecepatan aliran maksimum sebesar 43.5 kali. Kecepatan ( $v$ ) pada Skenario 3 lebih cepat 37.9% daripada Skenario 2. Rentang kecepatan dari 0.2 m/s hingga 8.7 m/s menunjukkan perubahan kecepatan yang signifikan saat tanah berubah bentuk dari kondisi plastis ke kondisi *viscous liquid*. Penurunan nilai viskositas yang kecil saat kondisi *viscous liquid* menghasilkan peningkatan kecepatan yang tipis pula.

*Mudflow* dianggap terjadi pada saat kecepatan ( $v$ ) lebih tinggi dari 0.05 m/s (Hung et al. 2001). Pernyataan ini hanya dapat diterima jika kadar air *mudflow* sama dengan atau lebih besar dari batas cair (LL), hal ini dijelaskan dari hasil analisa Skenario 2 dan Skenario 3.

Perbedaan kondisi *mudflow* menunjukkan perubahan viskositas yang akan berpengaruh pada pengklasifikasian pergerakan tanah (longsor atau *mudflow*). Pergerakan tanah dimulai saat kondisi plastis, di mana longsor terjadi pertama kali (Skenario 1). Kemudian, saat kadar air ( $w$ ) meningkat hingga besarnya sama dengan batas cair (LL), tanah akan bergerak mengalir menjadi *mudflow* (Skenario 2). Jika kadar air ( $w$ ) mengalami peningkatan lebih tinggi (Skenario 3), kecepatan aliran juga meningkat seiring dengan penurunan viskositas dan berubah menjadi kondisi cair. Hasil simulasi ini membuktikan pernyataan O'Brien dan Julien (1998).

Oleh karena itu, parameter kunci dalam melakukan simulasi *mudflow* adalah nilai viskositas ( $\eta$ ). Perubahan kondisi tanah (dari kondisi plastis sampai kondisi (*viscous liquid*)) menjelaskan sifat perilaku *mudflow*, termasuk kecepatan aliran.

### 5.2.6 Flow Depth

Ketebalan aliran untuk Skenario 1 adalah 3.3 m. Sedangkan untuk Skenario 2 dan 3 memiliki ketebalan 2.9 dan 2.4 m. Karena kadar air ( $w$ ) pada Skenario 1 lebih kecil dari batas cair (LL) maka tanah berada pada keadaan plastis dan tidak dapat diklasifikasikan sebagai bentuk aliran (Lampiran 1). Ketebalan kedalaman aliran selama transportasi berkisar antara 0.5 – 3.3. Tidak ada material yang terdeposisi di daerah yang datar untuk Skenario 1. Pergerakan material berhenti saat masih berada di atas lereng dekat dengan *source area* dengan waktu 1 jam 42 menit.

Skenario 2 menunjukkan material mengalir dari *source area* dengan karakteristik seperti sebuah aliran selama proses transportasi, kadar air Skenario 2 yang paling mendekati batas cair. Material tanah mencapai daerah deposisi selama 1 jam dengan ketebalan aliran antara 1.7 m hingga 3.8 m. Lampiran 2 menunjukkan pergerakan ketebalan material tanah selama transportasi dan menegaskan bahwa pergerakan material untuk Skenario 2 memiliki karakteristik sebagai aliran material.

Skenario 3 memiliki kecenderungan bentuk pergerakan material yang sama dengan Skenario 2 (Lampiran 3). Ketebalan material aliran selama transportasi berkisar antara 0.4 – 3.6 m, hampir sama dengan ketebalan aliran pada Skenario 2. Waktu yang dibutuhkan material tanah untuk mengalir dari *source area* hingga berhenti di area deposisi adalah 32 menit 48 detik. Ketebalan material di daerah deposisi adalah 2.4 m, dibandingkan dengan hasil pengukuran di lapangan, ketebalan material di daerah deposisi berkisar antara 1.5 – 2.5 m. Jadi, hasil Skenario 2 dan 3 relatif mendekati kondisi aktual di lapangan. Karena pengurangan nilai  $C_v$  (*solid concentration by volume*) Skenario 3 menghasilkan ketebalan material aliran yang semakin kecil, nilai  $C_v$  sangat mempengaruhi ketebalan aliran material.

## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1 Kesimpulan

- Peningkatan kadar air ( $w$ ) dan pembebanan merupakan pemicu utama terjadinya *mudflow*.
- Area yang terkena oleh aliran *mudflow* pada Skenario 2 dan Skenario 3 tidak terlalu jauh berbeda disebabkan oleh selisih dari nilai viskositas, *yield stress* ( $\tau_y$ ), dan *solid concentration by volume* ( $C_v$ ) kedua skenario yang kecil. Hasil simulasi dari Skenario 3 direkomendasikan untuk analisis *mudflow* Sukaresmi, karena durasi yang dibutuhkan untuk *mudflow* bertransportasi relatif mendekati kondisi aktual *mudflow* di lapangan.
- Durasi perpindahan material *mudflow* dari *source area* hingga berhenti di daerah deposisi untuk Skenario 3 adalah 32 menit 48 detik dengan menggunakan hidrograf 20 menit dan asumsi bahwa aliran yang terjadi adalah aliran laminar. Berdasarkan observasi lapangan, waktu yang dibutuhkan material *mudflow* berpindah hingga akhirnya terdeposisi sempurna  $\pm 20$  menit.
- Parameter dari hasil uji *flow box* (FBT) yang digunakan untuk simulasi Skenario 3 pada program FLO-2D cukup memberikan hasil simulasi berupa durasi dan ketebalan maksimum aliran yang mendekati kondisi aktual di lapangan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa parameter yang didapat dari uji *flow box* (FBT) dapat langsung digunakan untuk simulasi *mudflow*.
- Hasil simulasi dari kasus *mudflow* Sukaresmi menegaskan *mudflow* terjadi saat kadar air ( $w$ ) sama dengan atau melebihi batas cair (LL), pada kondisi tersebut perbedaan kecepatan aliran dan ketebalan maksimum aliran masing-masing Skenario akan memiliki kecenderungan yang sama.

- Hasil simulasi Skenario 2 dan 3 mengkonfirmasi bahwa lokasi dari *source area* sesuai dengan pengukuran topografi di lapangan, termasuk letak daerah deposisi aliran *mudflow*.
- Perubahan nilai *yield stress* ( $\tau_y$ ) akan berpengaruh terhadap panjang transportasi aliran *mudflow*, jika  $\tau_y$  kecil maka panjang transportasi aliran akan semakin panjang, berlaku sebaliknya. Namun perubahan yang signifikan akan terjadi pada saat tanah berada pada kondisi plastis (*plastic state*). Pengaruh dari viskositas dan koefisien Manning ( $n$ ) akan berpengaruh secara signifikan pada kecepatan aliran ( $v$ ) saat tanah berada pada kondisi *viscous liquid*.

## 6.2 Saran

- Parameter *mudflow* dapat dicari menggunakan uji *flow box* (FBT) dan simulasi dapat dilakukan menggunakan program FLO-2D.
- Lebih baik jika dilakukan penelitian lebih lanjut tentang proses penjenruhan di daerah *source area* sehingga dapat diprediksi batas dan kapan terjadinya longsor yang kemudian memicu terjadinya *mudflow*.
- Pengalihan fungsi guna lahan yang dipengaruhi oleh aktivitas manusia di daerah bukit dapat menjadi pemicu terjadinya bencana *mudflow*, maka untuk mencegah terjadinya bencana tersebut sebaiknya daerah di perbukitan yang rawan dengan *mudflow* tidak dirubah fungsi lahannya dan tidak mendirikan pemukiman di lereng-lereng yang curam atau di kaki bukit.



## DAFTAR PUSTAKA

- Cruden, D.M. and Varnes, D.J. (1996). *Landslide types and processes, Landslides: investigation and mitigation*. Transp. Res. Board.
- Das, Braja M. (1993). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)* Jilid 1. Erlangga, Jakarta.
- d'Agostino, V. and Tecca, P.R. (2006). *Some considerations on the application of the FLO-2D model for debris flow hazard assessment*. WIT Transactions on Ecology Environment.
- Handy, R.L. and Spangler, M.G. (2007). *Geotechnical engineering: soil and foundation principles and practice*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J. and Hutchinson, J.N. (2001). *A review of the classification of landslides of the flow type, Environ. and Eng. Geoscience*.
- Ishibashi, I. and Hazarika, H. (2011). *Soil mechanics fundamentals*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Lu, Ning, Godt, Jonathan W., (2013). *Hillslope Hydrology and Stability*. Cambridge University Press. The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK.
- Rajapakse, R. (2008). *Geotechnical engineering calculations and rules of thumb*. Butterworth Heinemann, Maryland, USA.

Sharma, V. K. (2010). *Introduction to process geomorphology*, CRC Press, Boca Raton, USA.

Shroder, J. F. (1971). *Landslide of Utah: Salt Lake City*. University of Utah, Utah Geological and Mineral Survey Bulletin.

O'Brien, J.S. (2003). *Reasonable assumptions in routing a dam break mudflow*, *Proc. of Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. eds Rickenmann and Chen, Switzerland.

O'Brien, J.S. and Julien, P.Y. (1988). *Laboratory analysis of mudflow properties*. J. Hydraul. Eng., 114(8), 877-887.

Olson, E.P. (1989). *Croft flows, Engineering Geology and Geotech. Eng.* Balkema, Rotterdam, the Netherlands, 97-100.

Widjaja, Budijanto, D.P. Soesanto, F.P Hendriks, (2010). *Behavior of Mudflow and Its Impact for Land Use Planning*. Department of Civil Engineering, Parahyangan Catholic University, Bandung, Indonesia and Department of Construction Engineering, National Taiwan University and Technology, Taipei, Taiwan ROC.

Widjaja, Budianto, (2010). *Theory of Mudflow*. Prosiding Seminar Pengelolaan Infrastruktur dalam Menyingkapi Bencana Alam, Solo, Indonesia.

Widjaja, Budianto, (2012). *Viscosity Determination of Soil in Plastic and Viscous Liquid States for Elucidating Mudflow Behaviour*. Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan ROC.

Woods, Michael. and Mary B. (2007). *Mudflows and Landslides*. Lerner Publications Company, United States of America.

Woolhiser, D.A. (1975). *Simulation of unsteady overland flow, Unsteady flow in open channels*. Water Resources Publications, Fort Collins, USA